

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE*

*Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE, Indirizzo Strutture*

*TESI DI LAUREA*

**Punzonamento di lastre in cemento armato  
Metodi di rinforzo e approcci progettuali**

**Punching of Flat - Slabs  
Strengthening techniques and design approaches**

*Relatore:*

Prof. Ing. Maurizio Orlando

*Correlatori:*

Prof. Ing. António Pinho Ramos

Prof. Ing. Paolo Spinelli

*Candidati:*

Massimo Lapi

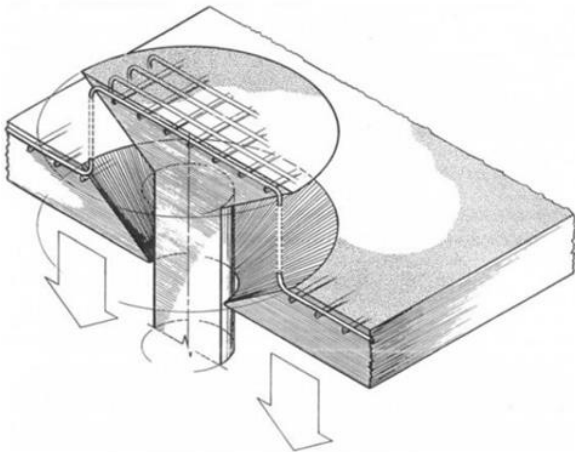
Daniele Martini

Emilio Zagli

Anno Accademico 2014/2015

## Sommario

La tesi ha come oggetto di studio il punzonamento nelle piastre in c.a., argomento che ha rappresentato, negli ultimi anni, la materia di numerosi studi e ricerche. Questo fatto è essenzialmente imputabile a due ragioni: la prima è da ricondursi ad una carenza conoscitiva del fenomeno e la seconda è dovuta ad alcuni crolli strutturali, causati dal punzonamento, che si sono registrati anche in tempi recenti.

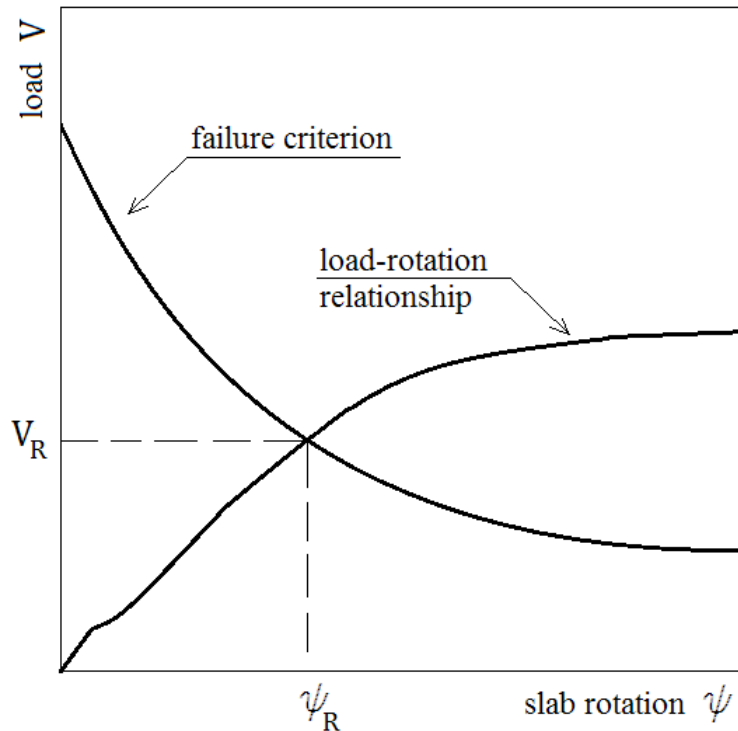


Schema di rottura per punzonamento



Vista inferiore di una lastra collassata per punzonamento

Nella tesi è stata innanzitutto svolta un'analisi dettagliata di tutte le principali normative internazionali, prestando particolare attenzione a due recenti proposte di revisione dell'Eurocodice 2. Il lavoro prosegue analizzando le principali teorie che negli ultimi anni sono state sviluppate per studiare il fenomeno, in particolare la "Critical Shear Crack Theory" (CSCT), teoria sviluppata dal Prof. Aurelio Muttoni del Politecnico di Losanna nel 2008.



Determinazione del carico di rottura tramite il modello della Critical Shear Crack Theory (CSCT)

Nella parte centrale del lavoro è stato trattato il tema del rinforzo strutturale di lastre esistenti, indagando le tecniche più diffuse di recupero e fornendo per ciascuna di esse un metodo di calcolo basato sulla CSCT. Tra queste, particolare attenzione è stata dedicata alla tecnica del BCO “Bonded Concrete Overlay” (strato di rinforzo in c.a. all’estradosso realizzato della piastra in prossimità del pilastro o carico concentrato), tecnica che è stata studiata sia sperimentalmente, nell’ambito di una campagna sperimentale alla quale gli autori della tesi hanno collaborato presso l’Università di Lisbona, sia analiticamente attraverso la formulazione di una procedura di calcolo basata sulla CSCT.

I principali contributi originali del lavoro di tesi possono essere riassunti come segue:

- attraverso un’analisi parametrica delle principali variabili presenti nella formulazione dell’Eurocodice 2, è stata messa in evidenza la loro influenza nel calcolo della resistenza a punzonamento;
- attraverso l’analisi di diverse campagne sperimentali sono state confrontate le previsioni di resistenza derivanti dai codici internazionali con quelle derivanti dalla CSCT;

- in particolare, riguardo ai codici, si sono state evidenziate le differenze fra l'attuale formulazione dell'Eurocodice 2 e due proposte di revisione, analizzando l'affidabilità di ognuna;
- analizzando le principali tecniche di rinforzo a punzonamento per lastre esistenti si sono definiti, a partire dalla CSCT, alcuni approcci progettuali capaci di adattarsi ad ogni tecnica;
- in particolare, circa la tecnica di rinforzo con BCO, è stato sviluppato un metodo di calcolo per la determinazione del carico ultimo a punzonamento; questo metodo di calcolo, basato sulla CSCT, è del tutto inedito;
- riguardo il comportamento e la resistenze dell'interfaccia calcestruzzo-BCO sono state evidenziate le incertezze e le carenze presenti nelle formulazioni proposte dai codici internazionali.

In sintesi il lavoro si è articolato in tre parti:

1. analisi delle norme tecniche internazionali;
2. analisi delle tecniche di rinforzo a punzonamento delle lastre in c.a.;
3. campagna sperimentale presso l'Università di Lisbona su lastre in c.a. rinforzate con la tecnica del BCO, analisi dettagliata dei risultati sperimentali e sviluppo di un metodo di calcolo capace di predire con buona approssimazione i risultati sperimentali.

# Disamina delle normative tecniche internazionali

## Attuali formulazioni empiriche

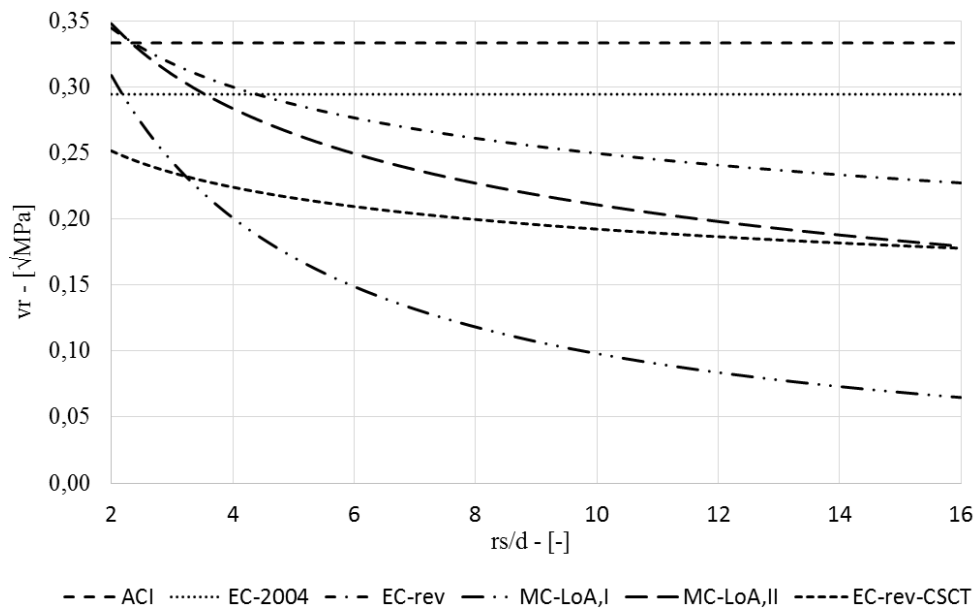
I codici che trattano il problema del punzonamento possono essere divisi in due gruppi: di derivazione empirica o di derivazione meccanica. Fanno parte del primo gruppo l'Eurocodice 2 e le ACI 318. Generalmente le formulazioni empiriche hanno i seguenti vantaggi:

- facilità di applicazione: i parametri che entrano in gioco nel calcolo sono pochi e di facile determinazione;
- velocità di applicazione: nella maggior parte dei casi viene proposta una formula di verifica compatta con cui si può immediatamente calcolare il carico ultimo per punzonamento.

Tra gli svantaggi si possono annoverare:

- perdita di contatto con il fenomeno fisico: non c'è diretta corrispondenza tra la formula ed il comportamento meccanico della lastra;
- scarsa adattabilità delle formulazioni a casi specifici: tali codici non sono utilizzabili per esempio per le tecniche di rinforzo.

In particolare per quanto riguarda la formulazione proposta dall'Eurocodice 2 si è notato un unico punto "debole". Dall'analisi parametrica si nota infatti un'assenza di sensibilità al parametro snellezza della lastra.



Comparazione della resistenza al punzonamento fornita dai principali codici internazionali – Dipendenza della resistenza dalla snellezza della lastra

Per quanto riguarda le altre variabili, il comportamento mostrato dall' Eurocodice 2 è simile a quello delle formulazione meccaniche.

### Attuali formulazioni meccaniche

I codici con formulazioni meccaniche che abbiamo esaminato sono: Model Code 2010 e SIA 262. Entrambi sono basati sulla Critical Shear Crack Theory (CSCT). Generalmente questi codici hanno i seguenti vantaggi:

- maggiore comprensione del fenomeno: grazie all'aderenza tra formulazione e comportamento meccanico;
- versatilità: si possono adattare a molte situazioni progettuali;
- migliore precisione nella predizione del carico di rottura.

Invece, tra gli svantaggi ci sono:

- complessità di utilizzo: in generale, l'uso di un modello meccanico è più laborioso;
- maggiore rischio di applicazione errata: calcoli più complessi possono comportare errori da parte del progettista.

Nel caso specifico del Model Code (lo stesso vale per la SIA 262), si è riscontrato una mancanza in termini di spiegazione del metodo. Non viene mai fatto diretto riferimento alle curve carico-

rotazione e al criterio di rottura. Non viene mai esplicitato che il carico ultimo per punzonamento è determinato dall'intersezione di queste due.

Nella nostra opinione un approccio così strutturato fa perdere uno dei vantaggi fondamentali dei metodi di derivazione meccanica, cioè la comprensione del fenomeno fisico.

### *Proposte di revisione dell'Eurocodice 2*

Come detto in precedenza, l'Eurocodice 2 fornisce risultati affidabili. Presenta però due anomalie. La prima, di cui abbiamo già parlato, riguarda la non sensibilità alla snellezza della lastra. La seconda riguarda la scelta del perimetro critico, fissato a  $(2 \cdot d)$  dal bordo della colonna, dove  $d$  è l'altezza utile della lastra. Nelle altre formulazioni il perimetro critico è posto a  $(d/2)$  dal bordo della colonna.

La proposta tedesca (Hegger et al.), che mantiene la struttura empirica, va nella direzione di colmare queste mancanze. In questa revisione viene cambiata la posizione del perimetro critico, allineandosi al Model Code 2010, e viene introdotta la dipendenza del carico di rottura per punzonamento dalla snellezza della lastra, attraverso il parametro di rapporto tra luce di taglio e altezza utile della lastra.

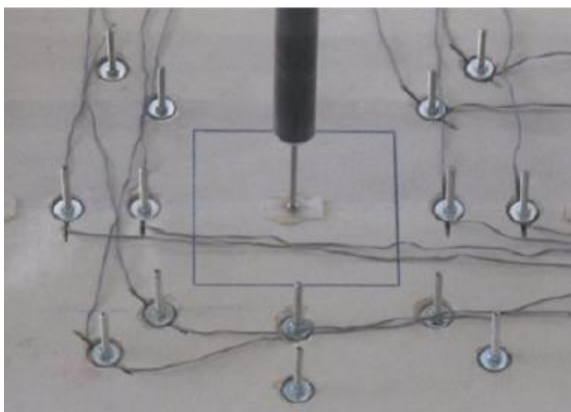
# Tecniche di rinforzo per lastre in C/A

L'analisi delle varie tecniche di rinforzo di lastre in C/A ha rappresentato una grossa parte del nostro lavoro. Tale sforzo è stato possibile grazie all'uso della "Critical Shear Crack Theory". La suddetta teoria, essendo di derivazione meccanica, risulta applicabile nelle più disparate situazioni progettuali. Inoltre, permette di considerare il reale stato deformativo della lastra al momento dell'applicazione del rinforzo. Questo aspetto risulta fondamentale nella pratica, infatti i risultati delle verifiche ottenuti, considerando o meno tale variabile, cambiano significativamente. Un'analisi di questo tipo non è tuttavia realizzabile utilizzando i codici internazionali.

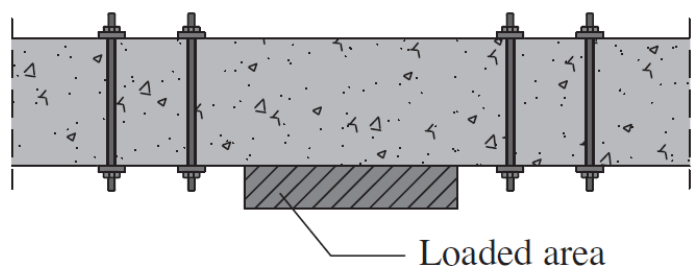
Per ogni tecnica di recupero esaminata, si è mostrato la procedura di calcolo delle curve carico-rotazione e del criterio di rottura. Tali curve deviano dalle curve originali ( in assenza di rinforzo ) in corrispondenza della rotazione raggiunta dalla lastra al momento del rinforzo. I metodi di progetto relativi all'allargamento del supporto, alla tecnica del rinforzo a taglio con FRP, e in special modo alla tecnica del BCO rappresentano nostre elaborazioni. Tali metodi analizzati possono essere suddivisi in tre tipologie: rinforzi a taglio e rinforzi a flessioni e allargamento del supporto.

## Metodi di rinforzo a taglio

Per quanto riguarda i rinforzi a taglio, la tecnica più diffusa è quella che prevede l'utilizzo di "connettori" post installati in acciaio o in FRP.



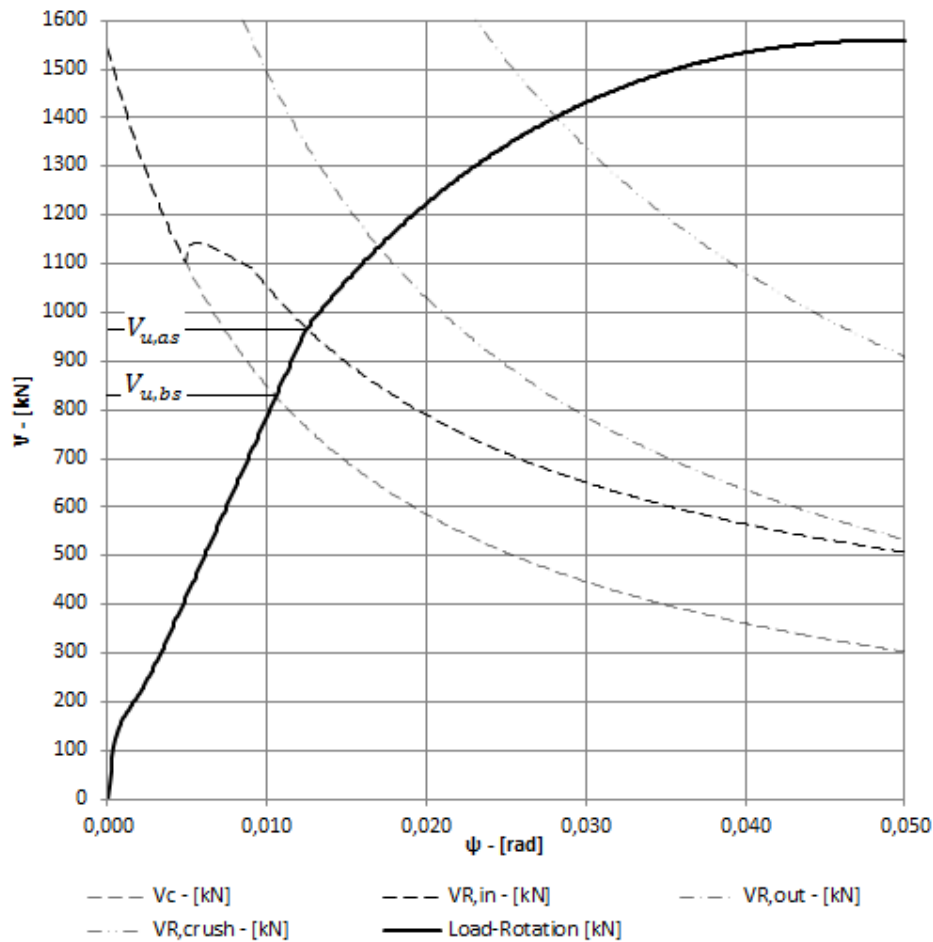
Prototipo di lastra rinforzata con connettori post-installati



Schema rinforzo con connettori post-installati



Questo tipo di rinforzo interviene solamente sul criterio di rottura, innalzandone la curva verso resistenze a taglio maggiori. Questo effetto incrementa sia il taglio che la rotazione a rottura per punzonamento.

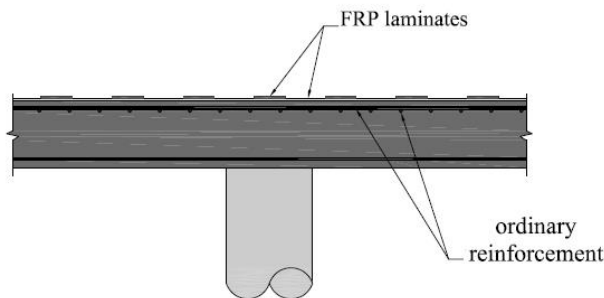


Curve carico-rotazione e criterio di rottura dopo intervento di rinforzo con connettori post-istallati

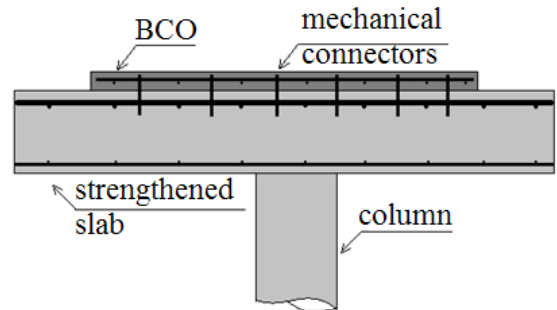
Un intervento in questa direzione incrementa la duttilità della lastra e quindi migliora il comportamento della stessa sotto azioni sismiche. Se lo scopo del rinforzo è unicamente quello di migliorare la capacità a punzonamento, questo tipo di intervento è sicuramente il migliore perché non comporta aumenti di carico e modifiche della rigidezza della struttura. Inoltre è la tecnica che comporta gli interventi meno invasivi.

### Metodi di rinforzo a flessione

Per quanto riguarda i rinforzi a flessione si è analizzato l'impiego di strisce in FRP, incollate sulla parte superiore della lastra, e l'applicazione di uno strato aggiuntivo in C/A (BCO), sempre sulla parte superiore della stessa.

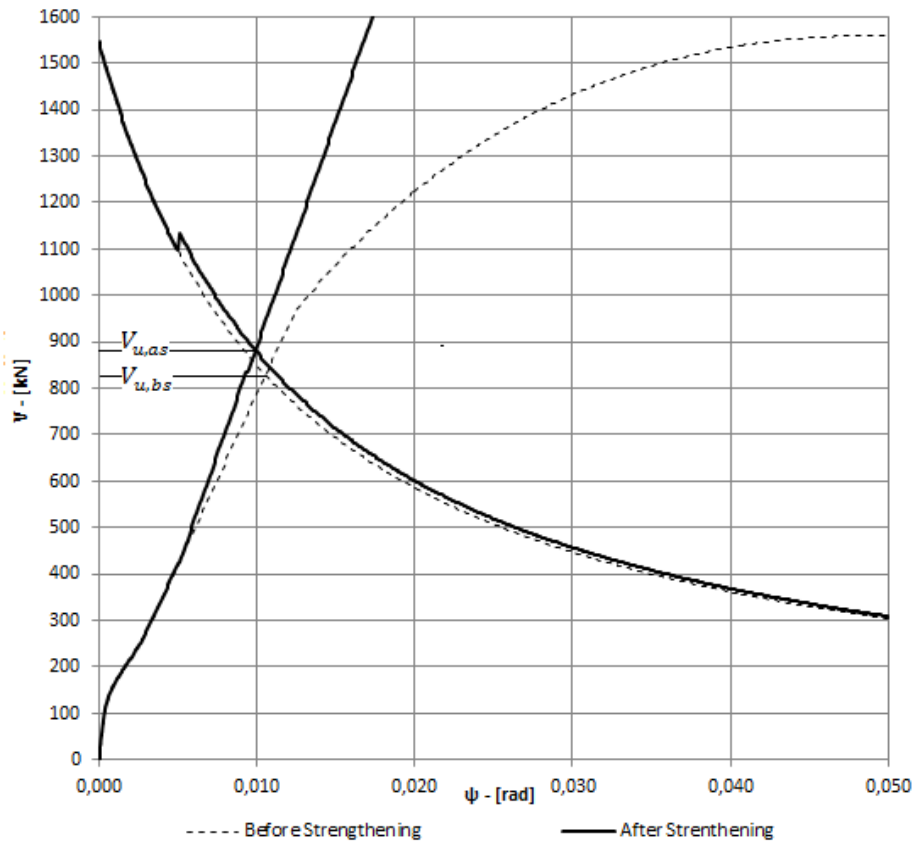


Applicazione pratica dell'intervento di rinforzo che prevede l'incollaggio di strisce di FRP incollate alla parte superiore della lastra e sezione trasversale del rinforzo



Schema di rinforzo con camicia superiore in c.a. (BCO)

Si parla di rinforzi a flessione perché tali interventi modificano il comportamento flessionale della lastra. La rigidezza flessionale aumenta perciò la curva carico-rotazione subisce un incremento di pendenza.



Curve carico-rotazione e criterio di rottura dopo intervento di rinforzo con strisce di FRP incollate alla parte superiore della lastra

Questo tipo di effetto produce un incremento del taglio ultimo per punzonamento ma implica, nella maggior parte dei casi, una riduzione della rotazione a rottura. Quindi nel complesso produce effetti negativi per la duttilità. Inoltre essendo usualmente le lastre in C/A molto armate, l'incremento di rigidezza flessionale che può essere raggiunto non è molto alto. Tali metodi sono perciò più indicati in situazioni in cui è necessario incrementare, in aggiunta alla capacità per punzonamento anche la capacità flessionale.

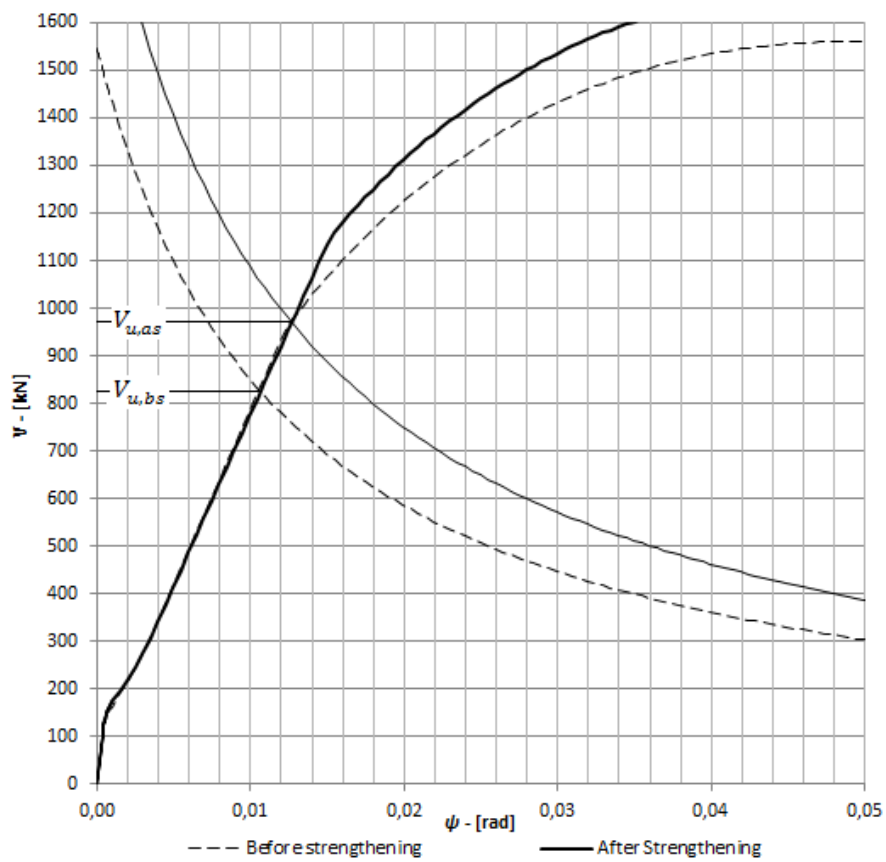
### Allargamento del supporto

Il rinforzo tramite allargamento del supporto rappresenta un'ulteriore tipo di intervento, che non può essere inserito in nessuna delle due categorie precedenti.



Esempio di intervento di rinforzo tramite creazione di un capitello

Tale metodo agisce sia sulla curva carico-rotazione sia sul criterio di rottura.



Curve carico-rotazione e criterio di rottura dopo intervento di allargamento del supporto

Se l'allargamento non è piccolo, permette di raggiungere un buon incremento della resistenza per punzonamento. Perciò questo tipo di intervento non è da scartare specialmente in zona sismica. Infatti in quest'ultimo caso si ricorre molto spesso all'incremento della sezione del pilastro.

# Metodo di rinforzo con Bonded Concrete Overlay (BCO)

Come esposto precedentemente, parte del nostro lavoro ha riguardato l'analisi delle principali tecniche di rinforzo di lastre esistenti. Tra queste, la tecnica del BCO, è quella sulla quale ci si è focalizzati maggiormente. Tale lavoro infatti prende spunto dall'attività di tirocinio svolta presso l'Università di Lisbona (FCT/UNL) sotto il coordinamento del Prof. António Pinho Ramos. All'interno di questa attività si è collaborato attivamente ad una campagna sperimentale dedicata proprio alla tecnica del BCO. Sono state testate quattro lastre rinforzate tramite un ulteriore strato di calcestruzzo armato (BCO).



Immagine prototipo lastra rinforzata con camicia superiore in c.a. prima della prova

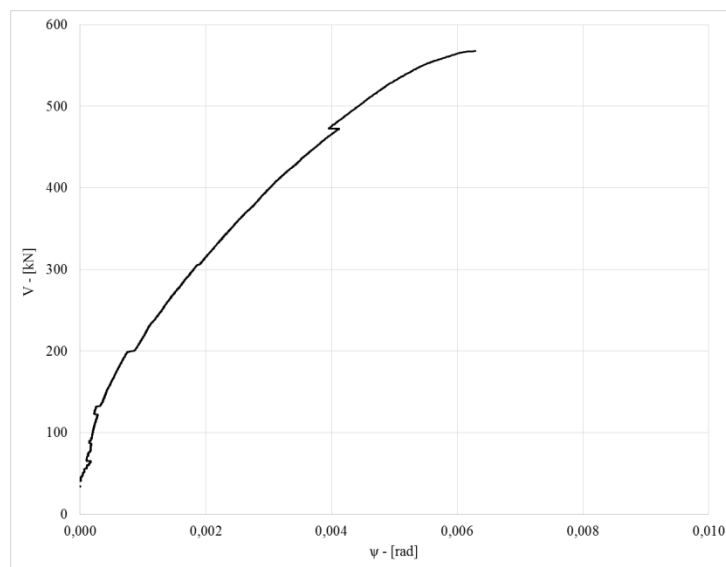
Questi quattro prototipi si differenziavano esclusivamente per la tipologia di connessione presente tra la lastra e il rinforzo. In tal modo si sono volute indagare anche le caratteristiche di resistenze delle interfacce calcestruzzo-calcestruzzo. Le tipologie di connessione sono le seguenti:

- Connessione garantita esclusivamente tramite l'aderenza tra i due strati di calcestruzzo. L'interfaccia della lastra è stato scarificato meccanicamente per aumentarne la scabrezza;
- Aderenza e ancoraggio delle barre longitudinali del BCO. Gli ancoraggi sono stati realizzati tramite inghisaggi chimici nella lastra;
- Aderenza e connettori meccanici. I connettori, costituiti da monconi di armatura piegati, sono stati assicurati alla lastra sottostante tramite inghisaggi;
- Aderenza, ancoraggio delle barre longitudinali e connetti meccanici;



Connettori a taglio

Durante le prove sono stati monitorati i livelli di carico nei martinetti e gli spostamenti registrati dai deflettometri. Queste misurazioni hanno permesso di costruire le curve di carico-rotazione di ogni lastra.



Curva carico rotazione sperimentale

Partendo dai risultati di questa campagna sperimentale si è arrivati a definire uno specifico metodo di calcolo per la tecnica di rinforzo in questione. L'obiettivo è stato quello di adattare la CSCT alla tecnica suddetta. Il principale problema è stato quello di definire le caratteristiche meccaniche della sezione composta. L'idea iniziale è stata quella di definire una sezione uniforme ( singolo strato di calcestruzzo con singolo strato di armature) equivalente alla sezione composta in termini di proprietà meccaniche. In ogni caso, è possibile abbandonare il percorso della sezione equivalente e seguire l'approccio rigoroso focalizzandosi nella sezione composta.

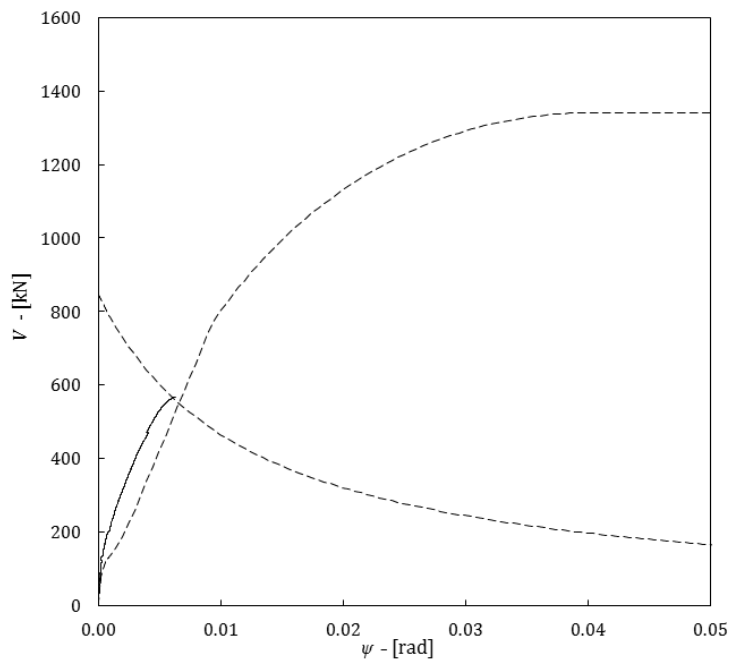


Rottura lastra STC

Le curve carico-rotazione sperimentali e teoriche risultano molto simili, in linea con i risultati ottenuti da Muttoni per lastre in c.a. non rinforzate. Anche il criterio di rottura per punzonamento sembra attendibile per i due prototipi che hanno raggiunto la rottura per punzonamento, la resistenza prevista comparata con quella sperimentale risulta pressoché identica:

$$\left( \frac{V_{R,test.}}{V_{R,prev.}} \right)_{average} = 0.99$$

$$\left( \frac{V_{R,test.}}{V_{R,prev.}} \right)_{Coeff. \ of \ var.} = 0.03$$



Curva carico-rotazione sperimentale (linea continua) – Curva carico-rotazione e criterio di rottura teorici (linee tratteggiate)